



TITLE:

Study on the Application of Shear-wave Elastography to Thin-layered Media and Tubular Structure: Finite-element Analysis and Experiment Verification( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Jang, Jun-keun

---

CITATION:

Jang, Jun-keun. Study on the Application of Shear-wave Elastography to Thin-layered Media and Tubular Structure: Finite-element Analysis and Experiment Verification. 京都大学, 2016, 博士(人間健康科学)

ISSUE DATE:

2016-09-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19970>

RIGHT:

許諾条件により本文は2017-08-01に公開

京都大学	博士（人間健康科学）	氏 名	張 俊根
論文題目	Study on the Application of Shear-wave Elastography to Thin-layered Media and Tubular Structure: Finite-element Analysis and Experiment Verification (Shear-wave Elastography 法の薄板状と円筒状の媒質への適用に関する研究：有限要素解析と実験的検証)		
(論文内容の要旨)			
<p>動脈硬化は、突然死をもたらす心筋梗塞や脳梗塞などの心血管疾患の危険因子として考えられている。このため医療超音波技術を用いて動脈壁硬化を非侵襲的かつ定量的に推定する装置の研究開発が行われているが、近年、がん腫瘍の診断用に Shear Wave Elastography(SWE)が実用化され、その動脈硬化診断へ応用が注目を浴びている。これは、せん断波の速度(<math>C_s</math>)を計測し、その 2 乗が組織弾性(<math>E</math>)に比例する(<math>E=3\rho C_s^2</math>, <math>\rho</math> は密度)ことを用いている。しかし、従来の SWE 法では TOF(Time-of-flight)法により、は <math>C_s</math> を群速度と仮定して計測しているため、動脈壁のような厚みの薄い媒質を伝搬するせん断波の <math>C_s</math> が正確に推定できない課題があった。この限界を克服するため、Lamb 波の速度分散曲線をカーブ・フィッティングすることで <math>C_s</math> を推定する Lamb 波理論に基づく推定法が提案されたが、平板モデルから導かれた Lamb 波理論を、血管のような円筒状の媒質に適用できるかが明確ではない。本研究では、SWE 法を用いて動脈壁硬化を推定するために、有限要素解析による数値シミュレーション、およびファントム実験や豚大動脈用いた Ex Vivo 実験によって、従来の TOF 法と比較しながら Lamb 波理論に基づく推定法の有効性に関して検討した。</p> <p>最初に、2 次元の平板モデルに対する数値シミュレーションにより、波長に比較し薄い組織の場合は、せん断波が速度分散性(周波数ごとに伝搬速度が異なる現象)を有するため、TOF 法では <math>C_s</math> が正確に求められないが、Lamb 波理論基盤の方法では設定値と正確に一致することを確認できた。</p> <p>次に、ファントム実験では、硬さの異なる（寒天 1.5%と 2%の）平板状ファントム(厚み 2mm)と円筒状ファントム(厚み 2mm、内径 4mm と 8mm)を製作し、両方の <math>C_s</math> 推定法で得られた結果を比較した。その際、バルク状ファントムに対しての SWE 装置の計測値を基準値とした(寒天 1.5%の <math>C_s</math> は <math>5.3\pm0.27\text{m/s}</math>、寒天 2%は <math>7.3\pm0.54\text{m/s}</math>)。平板状ファントムの測定結果として、TOF 法では寒天 1.5%は <math>3.23\pm1.06\text{m/s}</math>、寒天 2%は <math>4.45\pm1.33\text{m/s}</math> が得られ、基準値より低く評価される傾向が観られた。一方、Lamb 波理論に基づく推定法では寒天 1.5%は <math>5.0\text{m/s}</math>、寒天 2%は <math>7.2\text{m/s}</math> が得られ、基準値とほぼ一致することが確認できた。 また、血管を模した円筒状ファントムの推定結果として、寒天 1.5%に対し <math>5.3\text{m/s}</math>(厚み 2mm、内径 8mm)と <math>5.1\text{m/s}</math>(厚み 2mm、内径 4mm)、寒天 2%に対しては <math>7.3\text{m/s}</math>(厚み 2mm、内径 8mm) と <math>7.0\text{m/s}</math>(厚み 2mm、内径 4mm)が得られ、Lamb 波理論基盤の推定法が有効であることが検証できた。</p> <p>最後に、Ex Vivo 実験では、豚大動脈(2 つの試料)を用い、基準としての圧縮試</p>			

<p>験の値 (<math>130.3\pm18.4</math> と <math>111.7\pm8.8\text{kPa}</math>)に対し、両方の推定法で得られた弾性率(<math>E</math>)を比較した結果、TOF 法では <math>44.6\pm3.9</math> と <math>30.4\pm3.5\text{kPa}</math>、また Lamb 波理論に基づく推定法では <math>125.2\pm2.1</math> と <math>120.5\pm2.0\text{kPa}</math> が得られ、Lamb 波理論に基づく推定法がより精度が高いことが検証できた。</p> <p>以上の結果から、厚みの薄い平板状や円筒状媒質の場合、従来の TOF 法では速度分散性が原因で <math>C_s</math> が正確に推定できないが、Lamb 波理論に基づく推定法では <math>C_s</math> が精度よく推定できることが確認できた。そして本研究では Lamb 波理論を用いて円筒状媒質の <math>C_s</math> を推定するために、2 次元窓関数でせん断波の円周方向成分を除去することや、高周波数(本研究では 600~1200Hz)の領域に対して Lamb 波の分散曲線をカーブ・フィッティングすることを提案し、高精度で <math>C_s</math> が推定できることを実証した。</p> <p>本研究での検討した、円筒の形状や硬さは、ヒトの頸動脈を想定したものであり、その範囲であれば提案法で十分な精度で <math>C_s</math> が測定可能と言える。一方で、ファントム実験結果から内径が小さくなる程、また硬くなる程、低周波数領域で Lamb 波による近似精度が低下することが類推された。</p> <p>今後は、頸動脈と異なる部位の血管への適用限界や、拍動がある場合の測定精度への影響等の検討を通して、本研究をさらに発展させ、実用化を進める必要がある。</p>
<p>（論文審査の結果の要旨）</p> <p>動脈硬化は心筋梗塞や脳梗塞による突然死をもたらす危険因子となる。近年、超音波で体内にせん断波を伝搬させその伝搬速度(<math>C_s</math>)を計測して組織の硬さを評価する Shear Wave Elastography(SWE)が実用化され、その動脈硬化診断へ応用が試みられている。しかし、従来の SWE 法では群速度を仮定し TOF(Time-of-flight)法を用いて <math>C_s</math> を計測するため、動脈壁のような厚みが薄く円筒状の媒質を伝搬するせん断波の速度は正確に推定できない課題が残っていた。</p> <p>本研究では、SWE 法を用いて動脈壁硬化を高精度に推定するため Lamb 波理論に基づく推定法を提案しその有効性を検証した。まず、薄板を伝搬する波のシミュレーションでは、TOF 法に対し、提案法ではより高精度に求まることを確認した。次に血管ファントムや豚大動脈用いた実験では、2 次元フィルタによる円周方向伝搬成分の除去と速度分散曲線への Lamb 波理論式の近似により、高精度で <math>C_s</math> が推定できることを実証した。実験結果から内径減少や硬さ増大が、Lamb 波理論による近似精度に影響することが類推されたが、本研究で検討したヒトの頸動脈を想定した形状や硬さの範囲においては、<math>C_s</math> 測定の精度向上が可能なことが実証されたと言える。今後、実用化に向けて、適用限界や拍動の影響など検討すべき点が残されているが、本研究は非侵襲的な動脈硬化度診断の精度向上の点で効果的な手法を提示したものである。</p> <p>したがって、本論文は博士（人間健康科学）の学位論文として価値あるものと認める。</p> <p>なお、本学位授与申請者は、平成 28年 7月 8日実施の論文内容とそれに関連した試問を受け、合格と認められたものである。</p>